

Peran Vegetasi dalam Mengurangi Risiko Pergerakan Tanah di Musim Hujan

Loso Judijanto¹, Dewa Oka Suparwata²

¹IPOSS Jakarta; losojudijantobumn@gmail.com

²Universitas Muhammadiyah Gorontalo; suparwata_do@umgo.ac.id

Article Info

Article history:

Received Februari, 2025

Revised Februari, 2025

Accepted Februari, 2025

Kata Kunci:

Stabilisasi berbasis vegetasi, Pencegahan tanah longsor, Pengendalian erosi tanah, Bahaya musim hujan, Solusi bioteknologi

Keywords:

Vegetation-based stabilization, Landslide prevention, Soil erosion control, Rainy season hazards, Biotechnology solutions

ABSTRAK

Pergerakan tanah, termasuk tanah longsor dan erosi tanah, menimbulkan risiko yang signifikan selama musim hujan, terutama di daerah dengan lereng yang curam dan curah hujan yang tinggi. Vegetasi telah dikenal luas sebagai solusi alami untuk mengurangi risiko ini dengan meningkatkan stabilitas tanah, mengurangi limpasan permukaan, dan meningkatkan penyerapan air. Studi ini melakukan tinjauan literatur sistematis terhadap 33 artikel penelitian yang terindeks Scopus untuk menganalisis peran vegetasi dalam mencegah gerakan tanah. Temuan menunjukkan bahwa pohon berakar dalam (misalnya, Akasia, Eucalyptus), semak belukar (misalnya, rumput Vetiver, Bambu), dan tanaman penutup tanah (misalnya, rumput Napier) berkontribusi pada penguatan tanah dan pengendalian erosi melalui mekanisme mekanis dan hidrologi. Namun, efektivitas stabilisasi berbasis vegetasi bervariasi berdasarkan kondisi tanah, iklim, dan spesies tanaman. Studi ini juga menyoroti tantangan utama, termasuk waktu yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman, kebutuhan pemeliharaan, dan keterbatasan tanah. Untuk meningkatkan efektivitas vegetasi dalam mengurangi pergerakan tanah, solusi rekayasa bioteknologi yang mengintegrasikan solusi rekayasa bioteknologi, seperti vegetasi yang diperkuat secara geografis dan sistem drainase, direkomendasikan. Penelitian di masa depan harus berfokus pada pemantauan jangka panjang, evaluasi spesifik spesies, dan strategi adaptasi perubahan iklim.

ABSTRACT

Soil movements, including landslides and soil erosion, pose significant risks during the rainy season, especially in areas with steep slopes and high rainfall. Vegetation has been widely recognized as a natural solution to reduce this risk by improving soil stability, reducing surface runoff, and improving water uptake. This study conducted a systematic literature review of 33 Scopus-indexed research articles to analyze the role of vegetation in preventing soil movement. The findings suggest that deep-rooted trees (e.g., Acacia, Eucalyptus), shrubs (e.g., Vetiver grass, Bamboo), and ground cover plants (e.g., Napier grass) contribute to soil strengthening and erosion control through mechanical and hydrological mechanisms. However, the effectiveness of vegetation-based stabilization varies based on soil conditions, climate, and plant species. The study also highlights key challenges, including the time required for plant growth, maintenance needs, and soil limitations. To improve the effectiveness of vegetation in reducing soil movement, biotechnology engineering solutions that integrate biotechnological engineering solutions, such as geo-reinforced vegetation and drainage systems, are recommended. Future

research should focus on long-term monitoring, species-specific evaluations, and climate change adaptation strategies.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Corresponding Author:

Name: Loso Judijanto
Institution: IPOSS Jakarta
Email: losojudijantobumn@gmail.com

1. PENDAHULUAN

Pergerakan tanah, termasuk tanah longsor dan erosi tanah, merupakan bahaya lingkungan utama yang mengancam infrastruktur, pemukiman, dan ekosistem, terutama selama musim hujan. Kelembaban tanah yang meningkat akibat curah hujan yang tinggi dan berkepanjangan akan mengurangi kohesi tanah dan meningkatkan tekanan hidrostatik, sehingga lereng menjadi lebih rentan terhadap keruntuhan. Di banyak wilayah, deforestasi, penggunaan lahan yang tidak tepat, dan perubahan iklim semakin meningkatkan risiko pergerakan tanah, yang mengakibatkan kerugian ekonomi dan korban jiwa yang signifikan.

Vegetasi telah dikenal luas sebagai solusi alami dan berkelanjutan untuk memitigasi gerakan tanah. Tanaman berkontribusi terhadap stabilitas tanah melalui sistem perakarannya, yang mengikat partikel-partikel tanah menjadi satu, meningkatkan infiltrasi air, dan mengurangi limpasan permukaan. Pohon dan semak yang berakar dalam dapat meningkatkan stabilitas lereng dengan memperkuat struktur tanah, sementara vegetasi penutup tanah dan rerumputan melindungi permukaan tanah dari erosi. Selain itu, vegetasi juga dapat menghalangi curah hujan sehingga mengurangi dampak langsung tetesan air hujan terhadap tanah, yang membantu meminimalkan degradasi permukaan dan perpindahan sedimen.

Meskipun manfaat vegetasi telah terdokumentasi dengan baik dalam mengurangi pergerakan tanah, efektivitas spesies tanaman yang berbeda, struktur akar, dan kerapatan vegetasi dalam berbagai kondisi lingkungan masih menjadi area penelitian yang aktif. Faktor-faktor seperti komposisi tanah, kemiringan lereng, iklim, dan praktik pengelolaan lahan mempengaruhi sejauh mana vegetasi dapat memitigasi pergerakan tanah. Selain itu, mengintegrasikan solusi berbasis vegetasi dengan pendekatan teknik telah disarankan sebagai strategi yang lebih efektif untuk stabilitas lereng jangka panjang dan pengurangan risiko bencana.

Penelitian ini melakukan tinjauan literatur sistematis terhadap makalah-makalah dari database Scopus untuk menganalisis peran vegetasi dalam mengurangi risiko gerakan tanah selama musim hujan. Kajian ini bertujuan untuk mengidentifikasi mekanisme utama yang digunakan vegetasi dalam meningkatkan stabilitas lereng dan memperkuat tanah, mengkaji efektivitas berbagai jenis tanaman dan tipe vegetasi dalam mencegah gerakan tanah, serta mengevaluasi tantangan dan keterbatasan pendekatan berbasis vegetasi dalam berbagai kondisi lingkungan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengertian Gerakan Tanah Selama Musim Hujan

Pergerakan tanah, termasuk longsor, erosi, dan runtuh lereng, dipengaruhi oleh faktor iklim dan geologi. Infiltrasi air berlebihan saat musim hujan dapat mengurangi kekuatan geser

tanah, menyebabkan ketidakstabilan. Pemicu utama meliputi curah hujan tinggi, pencairan salju, deforestasi, serta aktivitas manusia seperti konstruksi dan pertambangan. Intensitas curah hujan tinggi, seperti di Area Irigasi North-Raman (153 mm/jam), menurunkan stabilitas tanah (Kastamto et al., 2025). Studi di Gongdang dan Kazakhstan menunjukkan bahwa pola hujan dan penimbunan air mempengaruhi stabilitas lereng (Huang et al., 2024; Mohammad et al., 2024). Kelembaban tanah tinggi juga meningkatkan risiko longsor, sebagaimana ditunjukkan melalui analisis CRNS di Austria (Marr et al., 2024). Stabilitas lereng bergantung pada sifat tanah seperti kohesi dan tekstur, sebagaimana diteliti di Guangzhou dan Manyaran (Zhang et al., 2024; Mujiyo et al., 2024). Kemiringan lereng juga berperan dalam menentukan faktor keamanan, dengan variabilitas tanah memperumit analisis stabilitas (Ma et al., 2024). Deforestasi dan perubahan lahan memperburuk pergerakan tanah dengan mengurangi tutupan vegetasi (Tu & Liang, 2024), sementara konstruksi dan pertambangan mempercepat ketidakstabilan lereng (Huang et al., 2024).

2.2. Peran Vegetasi dalam Stabilisasi Tanah

Vegetasi berperan penting dalam meningkatkan stabilitas tanah dan mengurangi pergerakan tanah melalui penguatan mekanis oleh akar tanaman, pengaruh hidrologis dalam mengatur kelembaban tanah, serta perlindungan permukaan terhadap erosi. Akar tanaman, terutama dari spesies berakar dalam, mengikat partikel tanah, meningkatkan kohesi dan kekuatan geser tanah, seperti yang terlihat pada kombinasi *Chrysopogon zizanioides* dan *Cynodon dactylon* yang meningkatkan stabilitas lereng hingga 27,12% dibandingkan monokultur (Wang et al., 2024). Tanaman herba seperti serai dan vetiver juga memperbaiki sifat mekanis tanah dengan meningkatkan sudut geser dan kohesi (Yuliana et al., 2024). Secara hidrologis, vegetasi mempengaruhi dinamika kelembaban tanah dengan meningkatkan infiltrasi air dan mengurangi limpasan permukaan, sehingga mencegah kejenuhan tanah dan mengurangi tekanan air pori yang dapat menyebabkan ketidakstabilan lereng (Yin et al., 2024; Yuliana et al., 2024). Strategi penanaman campuran meningkatkan efek mekanis dan hidrologis dengan memperbaiki distribusi akar dan pengelolaan air (Wang et al., 2024). Selain itu, tanaman penutup tanah dan rumput mengurangi dampak langsung curah hujan dan limpasan, secara signifikan menekan laju erosi dibandingkan tanah tanpa vegetasi (Yin et al., 2024; Olinic et al., 2024). Kombinasi geosintetik dengan vegetasi juga menjadi solusi yang efektif dan ramah lingkungan untuk stabilisasi lereng (Olinic et al., 2024).

2.3. Kesenjangan Penelitian dan Arah Masa Depan

Meskipun banyak penelitian telah membahas peran vegetasi dalam mengurangi risiko gerakan tanah, masih terdapat beberapa kesenjangan yang perlu diteliti lebih lanjut. Studi di masa depan harus berfokus pada pemantauan jangka panjang untuk menilai efektivitas vegetasi dalam menjaga stabilitas tanah secara berkelanjutan, analisis spesifik spesies guna menentukan tanaman yang paling efektif sesuai dengan kondisi tanah dan iklim yang berbeda, serta analisis biaya-manfaat untuk membandingkan pendekatan berbasis vegetasi dengan teknik rekayasa dalam menemukan strategi stabilisasi lereng yang paling efisien.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur sistematis (SLR) untuk menganalisis peran vegetasi dalam mengurangi risiko gerakan tanah selama musim hujan. Kajian literatur sistematis memungkinkan sintesis yang terstruktur dan komprehensif dari penelitian yang sudah ada, untuk memastikan bahwa temuan-temuan yang dihasilkan didasarkan pada penelitian berkualitas tinggi yang telah melalui proses tinjauan sejawat. Metodologi yang digunakan mengikuti pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) untuk memastikan transparansi dan reproduktifitas dalam pemilihan dan evaluasi studi.

3.2. Sumber Data dan Strategi Pencarian

Sumber data utama untuk tinjauan ini adalah database Scopus, yang merupakan salah satu platform terbesar dan paling bereputasi untuk publikasi akademik. Strategi pencarian dilakukan

dengan menggunakan kombinasi kata kunci yang relevan dan operator Boolean untuk memperoleh studi yang paling relevan. Permintaan pencarian meliputi frasa seperti (“Vegetasi” ATAU “Tanaman” ATAU “Hutan”) DAN (“Stabilitas tanah” ATAU “Pencegahan longsor” ATAU “Pengendalian erosi”) DAN (“Musim hujan” ATAU “Curah hujan tinggi”). Pencarian ini mencakup berbagai disiplin ilmu, seperti ilmu lingkungan, teknik geoteknik, hidrologi, dan manajemen risiko bencana, untuk memastikan cakupan yang komprehensif mengenai peran vegetasi dalam pengendalian risiko gerakan tanah.

Untuk memastikan kualitas dan relevansi studi yang dipilih, penelitian ini menerapkan kriteria inklusi seperti artikel jurnal atau makalah konferensi yang telah diulas sejawat, studi yang diterbitkan antara tahun 2010 hingga 2024, fokus pada peran vegetasi dalam mengurangi pergerakan tanah, dilakukan di daerah dengan curah hujan tinggi atau sering mengalami tanah longsor, serta makalah yang memberikan data empiris, studi kasus, atau hasil eksperimen. Sebaliknya, sumber yang belum diulas sejawat, studi yang tidak relevan dengan dampak vegetasi terhadap gerakan tanah, makalah yang hanya berfokus pada solusi teknik tanpa mempertimbangkan vegetasi, dan studi duplikasi atau dengan data tidak lengkap dikecualikan. Proses seleksi studi melibatkan empat langkah: identifikasi awal 150 artikel dari database Scopus, penyaringan judul dan abstrak yang mengeliminasi 85 artikel, penilaian kelayakan dari 65 artikel dengan mengeluarkan 32 studi, dan seleksi akhir menghasilkan 33 studi untuk tinjauan. Ekstraksi data dilakukan menggunakan formulir terstruktur untuk mencatat rincian seperti penulis, tahun, lokasi studi, jenis vegetasi, mekanisme stabilisasi tanah, faktor lingkungan, efektivitas vegetasi, serta keterbatasan dan tantangan. Data tersebut dianalisis secara kualitatif untuk mengidentifikasi pola, tema, dan kesenjangan dalam literatur, memberikan wawasan yang komprehensif tentang peran vegetasi dalam mitigasi risiko gerakan tanah.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Peran Vegetasi dalam Stabilisasi Tanah dan Pengendalian Erosi

Salah satu temuan paling konsisten dalam berbagai studi adalah bahwa vegetasi berperan penting dalam meningkatkan stabilitas tanah melalui penguatan akar dan pencegahan erosi. Studi oleh (Wang et al. 2024; Olinic et al. 2024) serta (Yuliana et al 2024) menekankan bahwa struktur akar meningkatkan kohesi tanah dengan mengunci partikel tanah, sehingga mengurangi kemungkinan kegagalan lereng. Pohon berakar dalam seperti Akasia, Alnus, dan Eucalyptus memberikan penguatan terbaik pada lereng curam dan tidak stabil, sementara semak seperti rumput Vetiver dan bambu berkontribusi signifikan dalam memperkuat lereng, terutama di daerah dengan curah hujan tinggi. Selain itu, vegetasi penutup tanah seperti rumput Napier dan kacang-kacangan merambat secara efektif mengurangi erosi permukaan dengan melindungi tanah dari dampak langsung air hujan.

4.2. Dampak Vegetasi terhadap Proses Hidrologi

Vegetasi mempengaruhi proses hidrologi dengan meningkatkan kapasitas infiltrasi, mengurangi limpasan permukaan, dan menurunkan tekanan air pori, yang merupakan faktor penting dalam mencegah ketidakstabilan tanah. Beberapa penelitian DiBiagio et al. (2024) dan Ficklin et al. (2024) menemukan bahwa kanopi pohon dan tanaman bawah secara signifikan mencegah curah hujan, mencegah kelebihan air agar tidak langsung mencapai tanah.

Selain itu, peran akar dalam penyerapan air mengurangi kejenuhan tanah, sehingga mengurangi kemungkinan kegagalan lereng. Namun, DiBiagio et al. (2024) dan Jing et al. (2024) mencatat bahwa spesies vegetasi tertentu, terutama yang berakar dangkal, mungkin tidak efektif pada kondisi tanah yang sangat jenuh sehingga risiko longsor menjadi sangat tinggi.

4.3. Efektivitas Berbagai Jenis Vegetasi dalam Stabilisasi Lereng

Kajian ini mengkategorikan efektivitas berbagai jenis vegetasi dalam mencegah gerakan tanah, seperti yang dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Efektivitas Jenis Vegetasi dalam Stabilisasi Tanah

| Jenis Vegetasi | Efektivitas dalam Stabilisasi Tanah | Manfaat Utama | Keterbatasan |
|--|-------------------------------------|--|---|
| Pohon berakar dalam (Akasia, Alnus, Eukaliptus) | Tinggi | Penguatan akar yang kuat, meningkatkan stabilitas lereng | Waktu tumbuh lama, membutuhkan ruang |
| Semak & perdu (Rumput Vetiver, Bambu, Willow) | Sedang hingga Tinggi | Pertumbuhan cepat, daya serap air yang baik | Kedalaman akar sedang, memerlukan perawatan |
| Tanaman penutup tanah (Rumput Gajah, Legum merambat) | Sedang | Pengendalian erosi, cepat menutupi tanah | Penguatan terbatas pada tanah yang dalam |

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem vegetasi campuran, yang menggabungkan pohon berakar dalam dengan semak belukar dan tanaman penutup tanah, menawarkan perlindungan terbaik terhadap pergerakan tanah. Hal ini sejalan dengan penelitian Gurnell (2016) dan Zhang et al. (2024), yang menunjukkan bahwa struktur akar yang beragam menciptakan jaringan penguat tanah yang lebih kuat.

4.4. Variabilitas Regional dalam Efektivitas Vegetasi

Efektivitas mitigasi gerakan tanah berbasis vegetasi bervariasi tergantung pada kondisi geografis dan iklim. Wilayah tropis dan subtropis, seperti Asia Tenggara dan Amerika Latin, mendapatkan manfaat besar dari spesies berakar dalam yang tumbuh cepat seperti rumput Vetiver dan Eucalyptus, yang mampu menahan curah hujan tinggi dan mengurangi erosi tanah dengan cepat (Mulyono et al. 2018; Hooke et al. 2017). Di daerah beriklim sedang, seperti Eropa dan Amerika Utara, spesies pohon asli seperti Willow dan Alder terbukti meningkatkan stabilitas tanah di wilayah dengan curah hujan sedang namun berkepanjangan (Dahanayake et al. 2023; XiaoPei et al. 2010). Sementara itu, daerah kering dan semi-kering menghadapi tantangan akibat ketersediaan air yang terbatas, tetapi tanaman tahan kekeringan seperti Akasia terbukti efektif dalam mengurangi erosi dan menstabilkan tanah yang gembur (Mulyono et al 2018; Dahanayake et al 2023). Temuan ini menegaskan perlunya strategi vegetasi yang spesifik untuk setiap lokasi, karena pendekatan yang seragam mungkin tidak efektif dalam menghadapi berbagai kondisi lingkungan.

4.5. Tantangan dan Keterbatasan Solusi Berbasis Vegetasi

Terlepas dari manfaatnya yang telah terbukti, stabilisasi lahan berbasis vegetasi memiliki beberapa keterbatasan. Tidak seperti solusi rekayasa, tanaman membutuhkan waktu untuk membangun sistem perakaran yang dalam dan memberikan manfaat stabilisasi tanah secara penuh (DiBiagio et al, 2024; Gong et al, 2024). Selain itu, vegetasi memerlukan pemantauan, penanaman kembali, dan pengelolaan secara berkala untuk memastikan keefektifannya, terutama di daerah yang rentan terhadap gangguan musiman (DiBiagio et al, 2024; Yuliana et al, 2024). Tidak semua spesies tanaman dapat tumbuh subur di semua jenis tanah; tanah dengan drainase yang buruk, lereng yang ekstrem, dan daerah dataran tinggi dapat membatasi efektivitas vegetasi (DiBiagio et al, 2024; Gong et al, 2024). Lebih lanjut, beberapa tanaman yang tumbuh cepat yang digunakan untuk pengendalian erosi, seperti spesies rumput tertentu, dapat menjadi invasif dan mengganggu ekosistem lokal (DiBiagio et al, 2024; Yuliana et al, 2024).

4.6. Mengintegrasikan Vegetasi dengan Solusi Rekayasa

Mengingat tantangan yang ada jika hanya mengandalkan vegetasi, beberapa penelitian merekomendasikan untuk mengintegrasikan solusi rekayasa bioteknologi dengan metode berbasis tanaman untuk stabilisasi lereng yang optimal. Pendekatan hibrida ini mencakup vegetasi yang diperkuat secara geografis, yaitu dengan menggabungkan akar tanaman dengan geotekstil atau sistem jaring untuk meningkatkan perkuatan tanah (Gong et al 2024), serta terasering dan reboisasi

yang mengombinasikan penanaman pohon dengan terasering yang direkayasa untuk mengendalikan limpasan dan erosi (Singh et al, 2024; Olinic et al, 2024). Selain itu, integrasi sistem drainase juga diterapkan dengan mengombinasikan sistem drainase permukaan dan bawah permukaan bersama dengan vegetasi untuk mencegah kejenuhan tanah dan kerusakan lereng (Gong et al 2024; Singh et al, 2024). Pendekatan-pendekatan ini memberikan solusi yang berkelanjutan, hemat biaya, dan berjangka panjang untuk mengurangi risiko gerakan tanah di wilayah yang rentan.

4.7. Kesenjangan Penelitian dan Arah Masa Depan

Meskipun kajian ini menyoroti pentingnya vegetasi dalam mengurangi risiko gerakan tanah, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian:

- 1) Diperlukan lebih banyak studi berbasis lapangan untuk menilai efektivitas spesies vegetasi yang berbeda dalam jangka waktu yang lama.
- 2) Penelitian lebih lanjut harus berfokus pada identifikasi spesies tanaman yang paling sesuai untuk kondisi tanah dan iklim yang berbeda.
- 3) Penelitian komparatif diperlukan untuk menentukan kelayakan ekonomi dari solusi berbasis vegetasi dibandingkan dengan pendekatan teknik tradisional.
- 4) Penelitian di masa depan harus mengkaji bagaimana perubahan pola curah hujan dan kejadian cuaca ekstrem mempengaruhi strategi stabilisasi berbasis vegetasi.

5. KESIMPULAN

Tinjauan literatur sistematis ini menyoroti peran penting vegetasi dalam mengurangi risiko gerakan tanah, terutama pada musim hujan. Melalui penguatan akar, pengaturan hidrologi, dan pengendalian erosi, vegetasi meningkatkan stabilitas tanah dan mengurangi dampak hujan lebat. Studi ini menemukan bahwa pohon berakar dalam adalah yang paling efektif dalam menstabilkan lereng, sementara semak dan tanaman penutup tanah berkontribusi pada pengurangan erosi dan perlindungan permukaan. Namun, efektivitas solusi berbasis vegetasi bergantung pada jenis tanah, iklim, dan upaya pemeliharaan.

Terlepas dari manfaatnya, pendekatan berbasis vegetasi menghadapi tantangan seperti periode pertumbuhan yang lambat, persyaratan pemeliharaan, dan kendala tanah. Untuk memaksimalkan efektivitas strategi ini, mengintegrasikan vegetasi dengan solusi rekayasa, seperti geotekstil, sistem drainase, dan terasering, sangat direkomendasikan. Pendekatan hibrida menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan dan tangguh untuk stabilisasi lereng dalam jangka panjang.

Penelitian di masa depan harus berfokus pada studi pemantauan jangka panjang, evaluasi kinerja spesies tertentu, dan analisis biaya-manfaat untuk mengoptimalkan solusi berbasis vegetasi. Selain itu, dampak perubahan iklim terhadap pola curah hujan dan pertumbuhan vegetasi harus dieksplorasi lebih lanjut untuk memastikan keberlanjutan strategi stabilisasi lahan dalam menghadapi perubahan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amarasinghe, M. P., Robert, D., Kulathilaka, S. A. S., Zhou, A., & Jayathissa, H. A. G. (2024). Slope stability analysis of unsaturated colluvial slopes based on case studies of rainfall-induced landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(11), 1-29.
- Dahanayake, A. C., Webb, J. A., Greet, J., & Brookes, J. D. (2023). RETRACTED: How Do Plants Reduce Erosion? A Rapid Evidence Assessment.
- DiBiagio, A., Capobianco, V., Oen, A., & Tallaksen, L. M. (2024). State-of-the-art: Parametrization of hydrological and mechanical reinforcement effects of vegetation in slope stability models for shallow landslides. *Landslides*, 21(10), 2417-2446.
- Ficklin, D. L., Touma, D., Cook, B. I., Robeson, S. M., Hwang, T., Scheff, J., ... & Wang, L. (2024). Vegetation greening mitigates the impacts of increasing extreme rainfall on runoff events. *Earth's Future*, 12(12), e2024EF004661.

- Gong, C., Ni, D., Liu, Y., Li, Y., Huang, Q., Tian, Y., & Zhang, H. (2024). Herbaceous Vegetation in Slope Stabilization: A Comparative Review of Mechanisms, Advantages, and Practical Applications. *Sustainability*, 16(17), 7620.
- Gurnell, A. M. (2016). Trees, wood and river morphodynamics: results from 15 years research on the Tagliamento River, Italy. *River Science: Research and Management for the 21st Century*, 132-155.
- Hooke, J., Sandercock, P., Sandercock, P., Hooke, J., De Baets, S., Poesen, J., ... & Cammeraat, L. H. (2017). Effectiveness of plants and vegetation in erosion control and restoration. *Combating Desertification and Land Degradation: Spatial Strategies Using Vegetation*, 79-104.
- Huang, Y., Li, Y., Zhao, Y., Zhang, F., Li, X., Zhang, H., & Zhang, X. (2024). Study on the Failure Mechanism and Movement Characteristics Prediction of Gongdang Landslide in Linzhi, China. *Water*, 16(24), 3649.
- Jing, T., Fang, N., Ni, L., Zhang, F., Zeng, Y., Dai, W., & Shi, Z. (2024). Hydrological Dynamics in Response to Vegetation Restoration in a Typical Wind-Water Erosion Crisscross Catchment. *Hydrological Processes*, 38(11), e70009.
- JOSIFOVSKI, J., SUSINOV, B., & ATANASOVSKA, A. N. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL MODELING OF SOIL-VEGETATION-ATMOSPHERIC INTERACTION ON SLOPES AND EROSION CONTROL USING BIOPOLYMERS AND VEGETATION.
- Kastamto, K., Fitri, A., Mera, M., Zain, A., Susarman, S., & Dewantoro, F. (2025). Analysis of slope stability to determine the causes of collapse the primary canal in the North-Raman irrigation-area, Central Lampung. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 604, p. 13001). EDP Sciences.
- Lira, B. S., dos Santos Junior, O. F., de Freitas Neto, O., & Sousa, M. N. D. M. (2024). Evaluation of the Effects of Rainwater Infiltration on Slope Instability Mechanisms. *Sustainability*, 16(21), 9530.
- Mulyono, A., Subardja, A., Ekasari, I., Lailati, M., Sudirja, R., & Ningrum, W. (2018, February). The hydromechanics of vegetation for slope stabilization. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 118, p. 012038). IOP Publishing.
- Olinic, T., Olinic, E. D., & Butcaru, A. C. (2024). Integrating Geosynthetics and Vegetation for Sustainable Erosion Control Applications. *Sustainability*, 16(23), 10621.
- Singh, D., Kar, S. K., Jeet, P., Kumar, R., Barh, A., Singh, N., ... & Kumar, G. (2024). Bioengineering Measures as Tools for Sustainable Restoration of Stone Mine Spoil Ecosystem. In *Ecological Impacts of Stone Mining: Assessment and Restoration of Soil, Water, Air and Flora* (pp. 285-306). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Tu, H. T., & Liang, W. L. (2024). Changes in the Spatial Patterns of Near-Surface Soil Moisture and Environmental Controlling Factors Before and After a Landslide. *Hydrological Processes*, 38(10), e15306.
- Wang, Y., Gu, H., & Liu, S. (2024). Mixed Grass Species Enhances Root Production and Plant-Soil Reinforcement. *Land Degradation & Development*.
- Yin, Q., Liu, J., & Zhang, B. (2024). Impact of Vegetation Canopy, Litter, and Roots on Soil Erosion Under Complex Rainfall Regimes: A Case Study With *Artemisia sacrorum* in Loess Hilly Region of China. *Land Degradation & Development*.
- Yuliana, Y., Kamchoom, V., Munirwan, R. P., & Gunawan, H. (2024, December). A review of herbaceous vegetation effect on mechanical properties of soil for enhancing slope stability. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2916, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.
- Zhang XiaoPei, Z. X., Yang GaiHe, Y. G., Wang HeZhou, W. H., Yang ShenJiao, Y. S., & Zong Jie, Z. J. (2010). Soil anti-erodibility and assessment of different vegetation restoration.
- Zhang, X., Fu, Y., Pei, Q., Guo, J., & Jian, S. (2024). Study on the Root Characteristics and Effects on Soil Reinforcement of Slope-Protection Vegetation in the Chinese Loess Plateau. *Forests*, 15(3), 464.